

Tuomas Jarhio

PUHDISTAMOLIETTEIDEN KÄSITTELY BIOKAASUTEKNIIKALLA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
10/2019

TIIVISTELMÄ

Tuomas Jarhio: Puhdistamolietteiden käsittely biokaasutekniikalla
Kandidaattityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikka
12/2019

Nykyiset jätevedenpuhdistusmenetelmät tuottavat suuret määrät ylijäämaliettä, joka vaatii jatkokäsittelyä. Erityisesti jätevedenpuhdistamoilla laajasti käytössä oleva aktiivilieteprosessi tuottaa paljon bakteeripitoista lietettä, joka vaatii hygienisointia. Lietteiden asianmukainen jatkokäsittely on usein monimutkaisin ja kallein prosessi jätevedenpuhdistamolla, joten jatkokäsittelyn perusteellinen suunnittelu ja oikeaoppinen toteutus ovat tärkeitä tekijöitä jätevedenpuhdistusprosessin resurssien kulutuksen pienentämisessä. Biokaasukäsittelyllä voidaan hygienisoida ja stabilisoida syntyneitä lietteitä, jolloin lietteiden loppukäyttö helpottuu. Tämän lisäksi lietteen orgaanisesta aineesta saadaan tuotettua biokaasua, joka voidaan hyödyntää polttamalla, jolloin tuotetaan sähköä tai lämpöä. Puhdistamolietteiden käsittely biokaasutekniikalla mahdollistaa jäteveden energiasisällön hyödyntämisen, mikä pienentää jätevedenpuhdistusprosessin energiantarvetta.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin biokaasun tuotantoa kahdesta eri puhdistamolietteestä. Kokeet suoritettiin laboratoriomittakaavan biokaasureaktoreissa, joihin tutkittavaa lietettä syötettiin. Kokeet simuloivat normaalin biokaasureaktorin toimintaa, ja tavoitteena oli määrittää, testattavien puhdistamolietteiden soveltuvuus biokaasun tuotantoon. Tutkittavat lietteet olivat peräisin jätevedenpuhdistamoilta Eurasta ja Huittisista (Liete 1 Eurasta ja liete 2 Huittisista, liete 1:stä ajettiin reaktori 1:ssä ja liete 2:sta reaktori 2:ssa). Lietteiden biokaasuntuotannon tutkiminen on tärkeää, sillä ennen täyden mittakaavan tuotannon aloittamista on varmistettava, että liete on soveltuvaa biokaasun tuotantoon.

Kokeet kestivät yhteensä 50 päivää. Molempien reaktorien kuormitus oli melko pieni (reaktori 1: $0,58 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$, reaktori 2: $0,66 \text{ kgVS}/\text{m}^3\text{d}$), mikä johtui laimeista syötteistä. Liete 1:n keskimääräinen VS/TS-arvo oli tavallista matalampi (56,3 %), kun taas liete 2:n vastaava arvo oli 70,4 %, joka on tyypillinen arvo puhdistamolietteilte. Biokaasua muodostui reaktori 1:ssä $91,7 \text{ LCH}_4/\text{kgVS}$ ja reaktori 2:ssa $91,0 \text{ LCH}_4/\text{kgVS}$. Nämä arvot ovat pienempiä kuin puhdistamolieteperäisillä syötteillä yleensä. Myös VS-vähenemät jäivät molemmissa reaktoreissa normaalia pienemmiksi, suurimmaksi mitatuksi VS-vähenemäksi saatiin reaktori 1:ssä 18,6 % ja reaktori 2:ssa 29,3 %. Biokaasun metaanipitoisuus oli reaktori 2:ssa tyydyttävällä tasolla (59,4 %), mutta reaktori 1:ssä metaanipitoisuus jäi normaalia pienemmäksi (47,2 %). Tuloksista käy ilmi, että lietteillä on jonkinlaista metaanintuottopotentiaalia, mutta tarkempien ja luotettavampien tulosten saamiseksi olisi suoritettava jatkotutkimuksia, jossa tutkitaan tarkemmin myös lietteen kemiallisia ominaisuuksia. Tämän lisäksi lietteiden metaanintuottoa voitaisiin tutkia tarkemmin esimerkiksi BMP-testillä (biochemical methane potential).

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	5
2. BIOKAASUN TUOTANNON TEORIAA	7
2.1 Anaerobinen hajoaminen	7
2.2 Syötteen kemiallisen koostumuksen vaikutus biokaasun tuotantoon	8
2.3 Reaktoriparametrit	9
3. BIOKAASUTEKNOLOGIA PUHDISTAMOLIETEDEN KÄSITTELYSSÄ	11
3.1 Lietteiden synty	11
3.2 Lietteiden esikäsittely	13
3.3 Biokaasun tuotantoprosessi	13
3.4 Käsittelyjäännöksen jatkokäsittely ja hyödyntäminen	14
4. MATERIAALIT JA MENETELMÄT	16
4.1 Reaktorikonfiguraatio	16
4.2 Operointiparametrit	17
4.3 Analyysit	18
5. TULOKSET	19
5.1 Kiintoaineen ja orgaanisen aineen muutokset reaktoreissa	19
5.2 Reaktorin kuormitus ja muodostunut biokaasu	21
6. TULOSTEN TARKASTELU JA YHTEENVETO	23
7. LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

TWh	Terawattitunti, energian yksikkö
Anaerobinen	Hapeton
Metaanintuottopotentialiaali	Biokaasun tuotannon syötteen teoreettinen metaanintuotto suhteessa orgaanisen aineen määrään
TS	Total solids, veden sisältämä kiintoaineen määrä
VS	Volatile solids, veden sisältämä orgaaninen aine, joka voidaan haihduttaa pois 550 °C lämpötilassa
BOD	Biological oxygen demand, tarvittava hapen määrä lietteessä olevan orgaanisen aineen biologiseen hajottamiseen
Flokkuloituminen	orgaanisen aineen kerääntyminen suuremmiksi hiutaleiksi (flopeiksi), jolloin partikkelikoko kasvaa
HRT	Hydraulic retention time, viipymäaika, jonka reaktoriin syötetty materiaali viettää reaktorissa
OLR	Organic loading rate, reaktorin orgaanisen aineen kuormitus tilavuutta ja aikayksikköä kohti
Mädäte	Biokaasureaktorista poistettava nestemäinen tai kiinteä käsitelyjäännös, joka ei ole prosessin aikana muuttunut biokaasuksi
Liete	Jätevedestä erotettava kiintoainetta sekä vettä sisältävä faasi
Yhteiskäsittelylaitos	Biokaasulaitos, jossa käsitellään erilaisia syötteitä yhdessä lantojen tai puhdistamolietteiden kanssa yhdessä samanaikaisesti
Saostus	Aineen erottaminen nestemäisestä faasista reagenssia lisäämällä, jolloin reagenssi ja erotettava aine muodostavat kiinteän saostuman
CSTR	Continuosly stirred tank reactor, biokaasuntuotannossa sekä muissa kemiallisissa reaktioissa käytettävä jatkuvatoiminen täyssekoitteinen reaktoriyhteyksi
Ympäri	Biokaasureaktorin käynnistyksen yhteydessä reaktoriin lisätävä syöte, joka sisältää biokaasun tuotannossa tarvittavia mikro-organismeja

BMP

Biochemical methane potential, standardisoitu testimen-
telmä, jolla mitataan syötteen metaanintuottopotentiaalia

1. JOHDANTO

Biokaasu on yksi vanhimpia ihmiskunnan käyttämiä energianlähteitä. Biokaasuteknologian aikaisimmat sovellukset ovat peräisin muinaisesta Sumeriasta noin 3000 eaa. ja varhaisimmat viitteet kiinalaisissa lähteissä ovat 1600-luvulta eaa. Moderni biokaasun tuotanto aloitettiin ensimmäisenä 1900-luvun alussa Intiassa, ja liikennepolttoainekäyttö aloitettiin ensimmäisenä Saksassa 1930-luvulla. Nykyään biokaasuteknologiaa on käytössä lähes kaikissa maissa (Kymäläinen, Pakarinen 2015). Vuonna 2015 EU:ssa tuotettiin biokaasua noin 182 TWh:n edestä, ja biokaasun tuotanto on Euroopassa kasvanut merkittävästi viime vuosina. Tuotetun biokaasun määrä on lähes seitsemänkertaistunut vuoden 2000 määrästä (noin 26,4 TWh vuonna 2000). Suurin vaikuttava tekijä tuotannon kasvuun on ollut anaerobisten mädättämöjen määrän kasvu. (Scarlat ym., 2018) Vuonna 2017 Suomessa tuotettiin noin biokaasua noin 0,7 TWh, mikä on vain noin 7 % tuotannon kokonaispotentiaalista (Winqvist ym., 2018).

Toimet ilmastonmuutosta vastaan ovat 2000-luvulla nousseet ihmiskunnan yhdeksi tärkeimmäksi tehtäväksi. Noin 85 % maailman primäärienergiasta tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, ja maailman energiankulutuksen on arvioitu kasvavan 50 % vuoteen 2050 mennessä (Sawatdeenarunat ym., 2016), näin ollen uusien puhtaampien ja uusiutuvien energianmuotojen kehittäminen on tärkeämpää kuin koskaan. Suomessa biokaasuntuotannon tehostamisella voitaisiin esimerkiksi korvata viidennes kotimaan liikenteen polttoaineista, tai kattaa lähes kokonaan maatalouden energiantarve. Suurin osa Suomen kasvihuonepäästöistä (74 %) on peräisin energiasektorilta, joten sinne myös tarvitaan suurimpia vähennyksiä. Kuitenkaan energiasektorilla ei voida korvata kaikkea fossiilista energiaa muutamalla uusiutuvan energian lähteellä, vaan tulevaisuuden energiantuotanto tulee perustumaan resurssitehokkaaseen, monimuotoiseen ja hajautettuun tuotantoon, jossa myös biokaasulla on oma roolinsa. (Winqvist, 2018)

Biokaasun tuotanto on biologinen, anaerobinen hajoamisprosessi. (Wellinger ym., 2013) Prosessissa mikrobit hajottavat orgaanista ainetta, jolloin syntyy biokaasua sekä reaktoriasta poistettavaa kiinteää tai nestemäistä käsittelyjäännöstä, eli mädätettä. Biokaasun raaka-aineeksi soveltuvat monenlaiset materiaalit, kuten biojätteet, jätevesilietteet (yhdyskuntien ja teollisuuden), lannat ja teollisuuden sivutuotteet. Suomessa suurin energiapotentiaali on kuitenkin peltobiomassassa, mutta usein biokaasuprosessin lähtökohdana voi energiantuotannon lisäksi olla raaka-aineen käsittely ympäristölle haitattomaan muotoon (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015). Jätteiden käsittely myös käsittää syötteen sisältämien ravinteiden talteenoton sekä kierrätyksen. Puhdistamolieteperäisiä biokaasuprosessin käsittelyjäännöksiä käytetään viherrakentamisessa ja myös peltoviljelyssä, mutta viime aikoina viljelijöiden kiinnostus puhdistamolietepohjaisiin käsittelyjäännöksiin on vähentynyt (Winqvist ym., 2018).

Teollisuuden ja yhdyskuntien jätevesiä käsitellään perinteisesti aerobisella aktiivilieteprosessilla, joka tuottaa suuren määrän ylijäämälietettä. Biokaasuteknologian rooli jätevesien käsittelyssä onkin ollut jätevedenpuhdistamojen aktiivilieteprosessissa syntyneen ylijäämälietteen stabliointi. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015). Vuoden 2017 lopussa Suomessa oli toiminnassa yhteensä 16 yhdyskuntajätevedenpuhdistamojen biokaasulaitosta,

viisi teollisuuden jätevesien biokaasulaitosta ja 22 yhteiskäsittelylaitosta (Winqvist ym., 2018).

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää kahden eri puhdistamolietteen soveltuvuus biokaasun tuotantoon. Tutkimuksessa suoritettiin kokeellinen osa, jossa ajettiin kahta laboratoriomittakaavan biokaasureaktoreissa 50:n päivän ajan. Lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan kirjallisuutta vastaavanlaisista kokeista sekä biokaasuteknologian roolista puhdistamolietteiden käsittelyssä.

2. BIOKAASUN TUOTANNON TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään biokaasuntuotannon teoriaa, kuten anaerobista hajoamista, syötteen ominaisuuksien vaikutusta biokaasun tuotantoon, sekä tyypillisiä biokaasun tuotannon reaktoriparametreja.

2.1 Anaerobinen hajoaminen

Biokaasun tuotanto perustuu anaerobiseen hajoamiseen, jossa mikrobit hajottavat syötteen orgaanista ainetta, jolloin muodostuu biokaasua ja mädätettä. Syötteen hajottamiseen osallistuva mikrobipopulaatio koostuu useista eri obligatiivisista sekä fakultatiivisista anaerobisista bakteereista. Obligatiiviset anaerobit sietävät ainoastaan anaerobisia olosuhteita, kun taas fakultatiiviset anaerobit pystyvät elämään sekä anaerobisissa että aerobisissa olosuhteissa. Mikrobipopulaation eri mikrobit ovat osittain riippuvaisia toisistaan. (Wellinger ym., 2013) Orgaanisen aineen hajoaminen ja metaanin muodostuminen syöttestä tapahtuu neljässä eri vaiheessa, jotka ovat riippuvaisia toisistaan. Näin ollen edellisen välivaiheen lopputuote toimii seuraavan välivaiheen lähtöaineena. (Al Seadi ym., 2008) Yhden välivaiheen häiriintyessä koko metaanintuottoprosessi hidastuu, ja ideaalitalanteessa biokaasureaktorissa hajoamisen välituotteet eivät pääse kertymään aiheuttaen inhibitiota, vaan välituotteiden muodostuessa seuraavan vaiheen reaktiot käyttävät niitä lähtöaineinaan. Anaerobinen hajoaminen voi tapahtua erilaisissa olosuhteissa (lämpötila, pH), ja käytännössä mikrobikanta valitaan olosuhteiden mukaisesti. (Kymäläinen ja Parkarinen, 2015). Anaerobinen hajoaminen tuottaa hyvin vähän lämpöä, joten suurin osa prosessin aikana tuotetusta energiasta on sitoutunut metaaniin. (Al Seadi ym., 2008)

Anaerobisen hajoamisen neljä välivaihetta ovat

1. Hydrolyysi
2. Fermentaatio, asidogeneesi
3. Anaerobinen hapettuminen, asetogeneesi
4. Metaanin muodostuminen, metanogeneesi

(Wellinger ym., 2013). Hydrolyysissa suuret orgaaniset molekyylit (polymeerit), kuten proteiinit ja hiilihydraatit, pilkkoutuvat osasikseen ja liukoistuvat. Hajoaminen tapahtuu mikrobien tuottamien entsyymien avulla, sillä syötteen suuret molekyylit eivät sovellu mikrobien ravinnoksi sellaisenaan. Tällaisia entsyymejä tuottavia bakteereita kutsutaan hydrolyyttisiksi bakteereiksi. (Al Seadi ym., 2008) Hydrolyysin lopputuotteita ovat rasvahapot, glyseroli, monosakkaridi ja aminohapot (Wellinger ym., 2013).

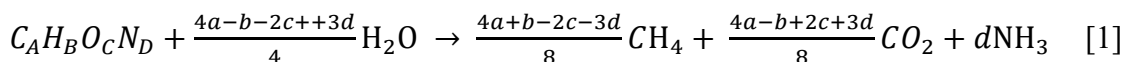
Hajoamisen toisessa vaiheessa, asidogeneesissä fermentoivat mikrobit muodostavat hydrolyysin lopputuotteista pienempiä käymistuotteita, kuten etikkahappoa, vetyä ja hiilidioksidia. Suurin osa asidogeneesin lopputuotteista on kuitenkin haihtuvia rashappoja (volatile fatty acids, VFA), kuten propionaattia, butyraattia ja alkoholeja. (Wellinger ym., 2013)

Kolmannessa vaiheessa, asetogeneesissä, tuotetaan asidogeneesiin lopputuotteista, joita ei voida suoraan muuntaa metaaniksi, metaanin tuotannon raaka-aineita, eli asetaattia, vetyä ja hiilidioksidia. (Al Seadi ym., 2008) Hapettavina yhdisteinä toimivat esimerkiksi nitraatti, sulfaatti ja karbonaatti (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015). Asetogeneesille on tyyppillistä asetogeenisten bakteerien symbioosi vetyä kuluttavien metanogeenien kanssa. Metanogeenit kuluttavat asetogeenien tuottamaa vetyä, mikä on myös asetogeneille edullista, sillä korkea vedyn osapaine estää asetogeenien toiminnan. (Al Seadi ym., 2008)

Viimeisessä vaiheessa, metanogeneesissä, metanogeenit tuottavat metaania ja hiilidioksidia asetaatista, vedystä ja hiilidioksidista (Al Seadi ym., 2008). Asetaattia käyttäviä metanogeenijä kutsutaan asetiklastisiksi ja vetyä käyttäviä hydrogenotrofisiksi. Noin 70% metaaninmuodostuksesta tapahtuu asetaatin kautta. (Wellinger ym., 2013) Metanogeneesi on koko anaerobisen hajoamisen hitain osaprosessi. Lisäksi se on herkkä olosuhteiden, kuten syötteen koostumuksen, kuormituksen, lämpötilan ja pH:n vaihtelulle. (Al Seadi ym., 2008) Lisäksi asetiklastiset metanogeenit kasvavat hitaasti (Wellinger ym., 2013). Tämä on oleellista biokaasureaktorin viipymääjan määrittämisessä: liian lyhyt viipymäaika voi johtaa hitaasti kasvavien asetiklastisten metanogeenien uloshuutoutumiseen reaktorista. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015)

2.2 Syötteen kemiallisen koostumuksen vaikutus biokaasun tuotantoon

Syötteen metaanintuottopotentialia voidaan määrittää teoreettisesti ja kokeellisesti. Jos syötteen kemiallinen rakenne ($C_AH_BO_CN_D$) tunnetaan, voidaan metaanintuoton yläraja määrittää Buschwellin yhtälöllä kaavan 1 mukaisesti:



Teoreettisesti lasketulla metaanintuotolla päästään kuitenkin usein liian optimistisiin tuloksiin, sillä yhtälössä ei oteta huomioon syötteen sisältämää hajoamatonta materiaalia sekä mikrobipopulaation energiantarvetta. Tarkempi arvio saadaankin kokeellisella määrityksellä, ja käytännössä BMP-testi on usein suositeltavampi vaihtoehto syötteen metaanintuoton arviointiin. (Wellinger ym., 2013) Buschwellin yhtälön käyttö myös vaatii tarkkaa tietoa syötteen alkuainekoostumuksesta. Kokeellisten määritysten ja teoreettisten arvioiden lisäksi syötteen metaanintuottoa voidaan arvioida sen kemiallisten ominaisuuksien, kuten kiintoaineen, orgaanisen aineen määrän sekä hiili-tyyppi – suhteen perusteella. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015)

Syötteen kiintoaineen ja orgaanisen aineen (TS, total solids ja VS, volatile solids) määrillä on oleellinen vaikutus biokaasun tuotantoon ja metaanin saantoon. Kiintoaineen osuus vaikuttaa syötteen siirrettävyyteen reaktoriin sekä prosessienergian tarpeeseen. Syötteen VS-pitoisuus kertoo, miten suuri osa syöttestä on muunnettavissa biokaasuksi ja vaikuttaa näin ollen metaanintuottopotentialiin. Mitä suurempi on syötteen VS/TS, sitä soveltuvampi syöte on biokaasun tuotantoon. Näin ollen syötteen VS/TS suhteella on mahdollisimman paljon orgaanista ainetta suhteessa kiintoaineen kokonaismäärään. Suomalaisilla puhdistamolietteillä VS/TS-suhde on yleensä 64 - 75%. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015)

TS:n ja VS:n lisäksi tärkeitä kemiallisia ominaisuuksia ovat hiili-tyyppi – suhde sekä syötteen pH. Hiili-tyyppi – suhde kertoo syötteessä olevan hiilen määrän suhteessa typen määrään. Optimalue biokaasuntuotannossa on 16:1 – 45:1. Liian korkea määrä typpeä voi johtaa prosessia inhiboivan ammoniakkin muodostumiseen, mutta typpeä on kuitenkin oltava tarpeeksi mikrobitoiminnan jatkumiseksi (Wellinger ym., 2013). Typen lisäksi myös fosfori on anaerobiselle hajoamiselle välttämätön ravinne. Tyypillisesti suomalaiset puhdistamolietteet sisältävät fosforia noin 25-35 gP/kgTS. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015). Biokaasun tuotannon syötteet ovat tyypillisesti tarpeeksi ravinnepitoisia, mutta esimerkiksi teollisuuden jätevedet ovat joskus liian ravinneköyhiä, jolloin ravinteita joudutaan lisäämään (Wellinger ym., 2013). Syötteen pH on myös oleellinen parametri anaerobisessa hajoamisessa. Metanogeneesi tapahtuu yleensä pH:n ollessa 5,5 – 8,5, ja optimi-pH on 7,0 – 8,0 useimmilla metanogeneeneilla. Mesofiilisten bakteerien optimaalinen pH-alue välillä 6,5 – 8,0, ja prosessi inhiboituu voimakkaasti pH:n laskiessa alle 6,0:n tai noustessa yli 8,3:n. (Al Seadi ym., 2008)

2.3 Reaktoriparametrit

Biokaasureaktorin toimintaa kuvataan erilaisin parametrein. Nämä ovat vakiintuneita suureita, jotka auttavat kuvaamaan reaktorin tilaa ja toimintaa. Yleisimpiä mitattavia suureita ovat kuormitus, viipymä, pH, lämpötila sekä kaasun määrä ja koostumus.

Kuormitus (OLR, eli organic loading rate), kuvaa reaktorin kuormitusta. OLR ilmaistaan orgaanisen aineen suhteena reaktorin tilavuuteen ja aikaan. OLR ilmoitetaan usein yksikössä kgVS/m³d. OLR lasketaan kaavalla 2.

$$OLR = \frac{Q_{VS}}{V_r}, \quad [2]$$

Jossa Q on virtaus reaktoriin (m³/d), VS syötteen VS-pitoisuus (g/m³) ja V_r reaktorin nestetilavuus (m³). (Wellinger ym., 2013) Suomalaisilla märkäprosessilaitoksilla OLR on tyypillisesti välillä 4-5 kgVS/m³d. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015) Liian suurilla kuormituksilla reaktori muuttuu herkemmäksi olosuhteiden vaihtelulle ja vaatii enemmän valvontaa. (Wellinger ym., 2013). Näin ollen sopiva kuormitus määritetään viime kädessä käytännössä: kuormitusta nostetaan vähitellen ja tutkitaan sen vaikutusta biokaasun tuotantoon. Sopiva kuormitus on riippuvainen niin syötteistä kuin olosuhteistakin sekä mikrobipopulaatiosta (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015).

Viipymällä tarkoitetaan teoreettista aikaa, jonka syöte viettää reaktorin sisällä. Viipymästä käytetään lyhennettä HRT, eli hydraulic retention time. HRT kuvaa keskimääräistä viipymää, mutta todelliset viipymät poikkeavat aina jonkin verran keskiarvosta. HRT valitaan siten, että saavutetaan riittävä VS:n hajoaminen reaktorissa, kuitenkin siten, ettei reaktorin tilavuus kasva liian suureksi. HRT:n yksikkönä käytetään useimmiten päiviä (Wellinger ym., 2013). Suomessa tyypillinen viipymäaika lietteille mesofiilisessa prosessissa on 12 – 30 d. Sopivaa viipymäaika ei ennakoon voi arvioida tarkasti, vaan se määritetään laitospohjaisesti syötön määrää säättämällä. Tyypillisesti HRT on riittävä, kun VS-vähenemä on tasolla 50 – 60 %, eikä biokaasun tuotannossa esiinny merkittäviä vaihteluita. (Latvala, 2009). HRT lasketaan kaavalla 3.

$$HRT = \frac{V_r}{Q}, \quad [3]$$

Jossa V_r on reaktorin tilavuus (m^3) ja Q syötteen virtaus reaktoriin (m^3/d) (Wellinger ym., 2013).

Prosessilämpötilalla on suuri merkitys biokaasuprosessin metaanintuottoon sekä VS:n hajoamiseen. Suomalaisilla biokaasulaitoksilla yleisin prosessi on mesofiilinen prosessi, jossa lämpötila on 35–37 °C. Mesofiilinen prosessi ei ole erityisen herkkä lämpötilavaihteluille, ja lisälämmityksen tarve on noin 10 – 30 % pienempi kuin termofiilisen prosessin, jonka lämpötila on 50–55 °C (Latvala, 2009). Termofiilisen prosessin suurimmat edut ovat patogeenien tuhoutuminen ja mikrobien suurempi kasvunopeus korkeissa lämpötiloissa, lyhempi viipymä ja tehokkaampi VS:n hajoaminen. Termofiilinen prosessi on kuitenkin herkempi lämpötilavaihtelulle, ja korkeampi lämpötila voi myös johtaa anaerobista hajoamista inhiboivan ammoniakkin muodostumiseen. (Al Seadi ym., 2008)

Muodostuvan biokaasun määrä ja metaanin osuus kaasussa kuvaavat oleellisesti biokaasuprosessin toimivuutta. Puhdistamolietteiden metaanintuotot vaihtelevat tyypillisesti välillä 160–400 $LCH_4/kgVS$ (Kymäläinen, Pakarinen, 2015, Wellinger ym., 2013). Metaanin osuus kaasun kokonaistilavuudesta on yleensä 60–70 %. (Davis, 2011). Vastaavallisissa kokeissa metaanin saannoksi on saatu yhdyskuntajätevedenpuhdistamon primäärilietteelle 372 $LCH_4/kgVS$ (Hautamäki, 2017), ja primääri – ja sekundaarilietteen sekoitukselle 198 $LCH_4/kgVS$ (Fathi Aghdam, 2014).

3. BIOKAASUTEKNOLOGIA PUHDISTAMO-LIETEDEN KÄSITTELYSSÄ

Jätevedestä erotettujen jäännösten, kuten lietteiden asianmukainen käsittely ja loppukäyttö on usein monimutkaisin ja kallein prosessi jätevedenpuhdistamolla (Davis, 2011). Puhdistamolietteiden käsittelyssä anaerobinen käsittely hygienisoi ja stabilisoi aktiivilieteprosessissa syntynyttä lietettä (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015), sekä pienentää lietteen kokonaistilavuutta (Al Seadi ym., 2008). Suurin osa yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla tuotetusta biokaasusta käytetään lämmön ja sähkön tuotantoon (Huttunen ym., 2017). Biokaasulla tuotettua lämpöä käytetään lähes jokaisella laitoksella ensisijaisesti reaktorin lämmittämiseen, ja tyypillisesti laitoksen omaan käyttöön kuluu noin 10 – 40 % tuotetusta biokaasusta (Latvala, 2009). Vuonna 2017 Suomessa tuotettiin yhteensä 172 milj. m³ biokaasua. Tästä yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla tuotettiin noin 20 %, eli 34 milj. m³, ja yhteiskäsittelylaitoksilla noin 36 %, eli 61 milj. m³ (Huttunen ym., 2017). Tässä luvussa käsitellään puhdistamolietteiden syntyä jätevedenpuhdistamoilla sekä biokaasuteknologian roolia niiden käsittelyssä.

3.1 Lietteiden synty

Nykyiset jätevedenpuhdistusmenetelmät tuottavat runsaasti ylijäämalietettä, joka vaatii jatkokäsittelyä. Mitä korkeampi on jäteveden puhdistuksen taso, sitä suurempi on liete-ylijäämä, joka täytyy käsitellä (Davis, 2011). Jätevedenpuhdistamoilla jätevettä käsitellään kemiallisin, fysikaalisin ja biologisin käsittelymenetelmin. Fysikaalisia menetelmiä ovat esimerkiksi välppäys, hiekanerotus ja selkeytys, jotka perustuvat fysiikan lakeihin ja ilmiöihin. Kemiallisissa menetelmissä, kuten kemiallisessa saostuksessa tai desinfioinnissa, puhdistus perustuu kemikaalin lisäykseen ja kemiallisiin reaktioihin. Biologisissa puhdistusmenetelmissä jäteveden puhdistus perustuu biologisiin reaktioihin, jotka vähentävät jäteveden epäpuhtauksia. Aktiivilieteprosessi on tunnetuin jäteveden biologinen puhdistusprosessi (Karttunen ym., 2004)

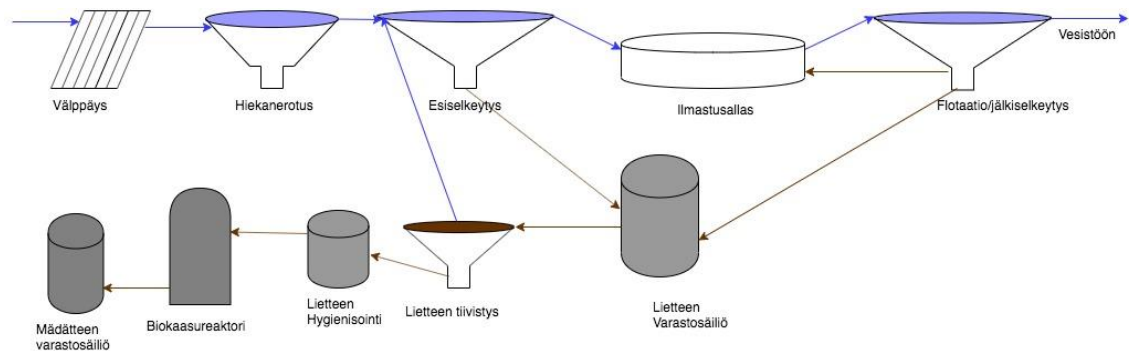
Jätevedenpuhdistamon yksikköoperaatiot voidaan järjestää monella tavalla, mutta tyypillisesti ne pitävät sisällään välppäyksen, hiekanerotuksen, esiselkeytyksen, aktiivilieteprosessin, jälkiselkeytyksen sekä jonkinlaisen desinfioinnin (Karttunen ym., 2004). Eri yksikköoperaatioissa erotetut lietteet voidaan luokitella lietteen ominaisuuksien ja syntypaikan mukaan. Esiselkeytyksessä erotettua lietettä kutsutaan yleisesti primääri – eli raakalietteeksi. Lietteen kemiallinen saostus tuottaa fosforipitoista lietettä. Ilmastusaltaan jälkeen erotettua bakteeripitoista lietettä kutsutaan bio – tai sekundäärilietteeksi. Jäteveden jälkiselkeytyksessä voi syntyä vielä laskeutus – tai flotaatiolietettä. Tyypillisesti kaikki jätevedenpuhdistamon lietteet yhdistetään ja syötetään vedenerotuksen jälkeen sekälietteenä biokaasureaktoriin tai muuhun jatkokäsittelyyn (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015).

Esiselkeytyksen tavoitteena on erottaa jätevedestä kiintoainetta sekä vähentää BOD₅-happenkulusta laskeuttamalla jäteveden kiintoainetta painovoiman avulla. Lisäksi etuselkeytyksessä poistuu suurempia partikkeleita, jotka eivät jo poistuneet välppäyksessä. Laskeutuvan kiintoaineen erottamiseen käytetään altaan pohjassa liikkuvaa lietelaahainta,

joka kerää lietettä altaan lietteen poistoputkeen, kun taas jatkokäsittelyyn poistuva jätevesi poistuu altaan reunojen yli virtaamalla. Esiselkeytyksessä käytetään usein kemikaaleja kiintoaineen laskeutumisen tehostamiseksi sekä kemialliseen fosforinpoistoon. Tyypillisesti tulevaan jäteveteen lisätään alumiinisulfaattia tai ferrikloridia yhdessä anionisen polymeerin kanssa. Tämä kasvattaa partikkelikokoa ja parantaa näin lietteen laskeutuvuutta. Lisäksi metallisuolat aiheuttavat fosforin saostumisen, jolloin fosfori poistuu jätevedestä laskeutuvan lietteen mukana. (Davis, 2011).

Esiselkeytyksen jälkeen olevan aktiivilieteprosessin päämääränä on jätevedessä olevan VS:n hajottaminen aerobisten mikrobien avulla. Lisäksi ammoniumtyppi ammoniumtyppi muutetaan biologisesti typpikaasuksi nitrifikaatiolla ja denitrifikaatiolla. Prosessin toiminta perustuu jäteveden orgaanisen aineen ja mikrobipopulaation perusteelliseen sekoittamiseen ilmastetussa altaassa, eli ilmastusaltaassa. Mikrobipopulaatio kasvaa ja käyttää ravintonaan jäteveden orgaanista ainetta. Mikrobien kasvaessa ja sekoittuessa ilmastuksen vaikutuksesta yksittäiset mikrobit flokkuloituvat ja muodostavat aktiivilietettä, eli aktiivisia mikrobeja sisältävää biologista massaa. Aktiiviliete otetaan talteen jälkiselkeytyksessä ja osa palautetaan palautuslietteenä takaisin prosessiin. (Davis, 2011)

Jäteveden jälkiselkeytys suoritetaan tyypillisesti painovoiman avulla laskeuttamalla tai flotaatiolla (Karttunen ym., 2004). Flotaatiossa jätevedestä erotetaan kevyitä partikkeleita nostamalla ne ilmakuplien avulla veden pinnalle. Erotettavat partikkelit tarttuvat veteen pumpattaviin ilmakupliin, jolloin ne nousevat altaan pinnalle. Lisäksi kiintoaineen tarttumista kupliin tehostetaan usein polymeerin lisäyksellä. Pintaan noussut liete erotetaan jätevedestä lieteaalaimella, joka kaapii pintaan kohonneen kiintoaineen altaasta poistuvasta jätevedestä. (Wang ym., 2010). Kuvassa 1 on esitetty yleiskuva tyypillisestä jätevedenpuhdistamosta. Kuvassa on kuvattu tyypillisimmät yksikköprosessit sekä lietteiden käsittely biokaasuteknologialla.



Kuva 1. Esimerkki jätevedenpuhdistamosta, jossa hyödynnetään anaerobista hajoamista lietteiden käsittelyssä

Kuvassa siniset nuolet kuvaavat jäteveden virtausta ja ruskeat nuolet lietteen virtausta. Biokaasureaktorissa muodostuvaa biokaasua ja sen käyttöä ei ole kuvattu, sillä muodostuva kaasu voidaan joko käyttää suoraan jätevesilaitoksella tai jalostaa myöhempää käyttöä varten.

3.2 Lietteiden esikäsittely

Lietteiden esikäsittelyn tarkoituksena ennen biokaasuprosessia on biokaasun saannon parantaminen, prosessin stabilisointi sekä anaerobisen hajoamisen nopeuttaminen. Esikäsittelymenetelmät voivat olla fysikaalisia, kemiallisia tai biologisia, ja usein käytetäänkin näiden yhdistelmiä. (Wellinger ym., 2013)

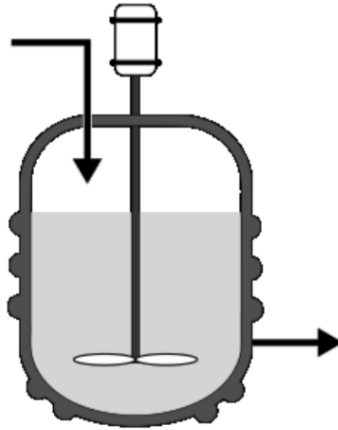
Puhdistamolietteen suurin biokaasuprosessia haittaava tekijä on hiekka. Pääsääntöisesti suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla hiekanerotus kuitenkin toimii niin hyvin, ettei hiekka muodostu ongelmaksi. Kuitenkin erityisesti vanhempien jätevedenpuhdistamojen hiekanerotuksessa voi olla ongelmia, jolloin hiekka päätyy puhdistamolietteen joukkoon. Tällöin hiekka voi aiheuttaa muun muassa pumppujen nopeaa kulumista sekä kerrostumia ja tukkeutumia. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015)

Pääsääntöisesti jätevedestä erotettavat lietteet ovat vesipitoisia TS-pitoisuuden ollessa noin 1 %. Näin ollen lietteitä on tiivistettävä ennen biokaasureaktoriin syöttämistä. Tiivistys voidaan suorittaa painovoiman avulla laskeuttamalla, jolloin TS-pitoisuus saadaan nostettua muutamaan prosenttiin, tai mekaanisella tiivistimellä, kuten rumputiivisimellä tai lietelingolla, jolloin TS-pitoisuus saadaan nostettua noin 10–15 %:n. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015)

Yleensä puhdistamoliete tulee hygienisoida ennen sen syöttöä biokaasureaktoriin. Hygienisointi voidaan suorittaa esimerkiksi termisesti. Termisessä hygienisoinnissa syöte lämmitetään vähintään tunnin ajaksi 70 °C:n lämpötilaan, minkä jälkeen se jäähdytetään ja syötetään biokaasureaktoriin. (Latvala, 2009)

3.3 Biokaasun tuotantoprosessi

Suomessa biokaasuntuotannossa käytettävien puhdistamolietteiden TS-pitoisuus on yleensä välillä 3–6 % (Huttunen ym., 2017). Näin ollen käsittely on suoritettava märkäprosessilla. Märkäprosessissa käytetään usein jatkuvatoimisia täyssekoitusreaktoreita, eli CSTR-reaktoreita (continuously stirred tank reactor), joissa reaktorin sisältö on tasaisesti sekoittunut (Wellinger ym., 2013). Tyypillinen viipymä suomalaisissa oloissa on 20–40 d (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015). Jatkuva sekoitus CSTR-reaktoreissa takaa ravinteiden tasaisen jakautumisen sekä lämpötilan pysymisen vakiona koko reaktorissa. Lisäksi jatkuva sekoitus mahdollistaa kaasun nousemisen pois liuoksesta. Jatkuva sekoitus kuitenkin on biokaasulaitoksen suurin yksittäinen sähkönkuluttaja (51 % kaikesta sähkönkulutuksesta) (Kress ym., 2018). CSTR-reaktori on kuvattu kuvassa 2.



Kuva 2. CSTR-reaktorin poikkileikkaus (Karppinen, 2017)

Biokaasureaktoria voidaan operoida joko jatkuva – tai panostoisesti. Jatkuvatoimisessa prosessissa syötteen virtaus reaktoriin ja mädätteen poisto reaktorista on jatkuvaa, ja näin ollen myös kaasua tuotetaan koko ajan. Panostoisessa prosessissa puolestaan syöte syötetään reaktoriin kerralla, ja poistetaan prosessin päätyttyä. (Al Seadi ym., 2008) Panostoiset prosessit ovat yleisimpiä kuivaprosesseilla, ja lietteiden nestemäisten syötteiden, kuten puhdistamolietteiden käsittelyssä käytetään lähes yksinomaan jatkuvatoimista märkäprosessia (Wellinger ym., 2013). Jatkuvan – ja panostoisuuden prosessin lisäksi biokaasun tuotantoprosessi voi olla myös pulijatkuva, jolloin syötteen lisäys ja mädätteen poisto ei ole jatkuvaa, mutta tapahtuu toistuvasti, esimerkiksi kerran päivässä (Al Seadi ym., 2008).

Biokaasun tuotantoprosessi voi olla joko yksi – tai kaksivaiheinen. Yksivaiheisessa prosessissa on yksi biokaasureaktori, jossa pääosa raaka-aineiden hajoamisesta tapahtuu, kun taas kaksivaiheisessa prosessissa on sarjassa kaksi erillistä reaktoria, joissa anaerobisen hajoamisen reaktiot tapahtuvat hieman toisistaan poikkeavissa olosuhteissa. Kaiken kaikkiaan yksivaiheinen prosessi on yleisempi vaihtoehto (Wellinger ym., 2013), ja märkäprosesseissa yksivaiheinen prosessi on käytössä noin 90 % uusimmissa biokaasureaktoreissa (Mao ym., 2015).

3.4 Käsittelyjäännöksen jatkokäsittely ja hyödyntäminen

Käsittelyjäännöksellä, eli mädätteellä, tarkoitetaan biokaasureaktorista poistettavaa ainesta, joka ei ole anaerobisen hajoamisen seurauksena muuntunut biokaasuksi. Käsittelyjäännöksen ja syötteen massavirrat ovat erityisesti märkäprosessissa käytännössä samat, ja käsittelyjäännös sisältää kaikki syötteen sisältämät arvokkaat ravinteet, kuten typpeä, fosforia, kaliumia ja magnesiumia. Käsittelyjäännös saattaa kuitenkin sisältää myös loppukäytön kannalta haitallisia yhdisteitä ja mikrobeja, kuten lääke – ja hormonivalmisteita, orgaanisia haitta-aineita, metalleja sekä *Salmonella* – ja *Kampylobakteereita*. Suomessa puhdistamolieteperäiset käsittelyjäännökset kuitenkin täyttävät pääosin hyvin niille asetetut hygieniä – ja laatuvaatimukset. Käsittelyjäännöksen haitalliset yhdisteet ja bakteerikannat voivat silti aiheuttaa ongelmia loppusijoituksen yhteydessä, joten asianmukainen käsittely, varastointi ja jatkoprosessointi ovat tärkeitä vaiheita ennen jäännöksen hyödyntämistä. (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015)

Puhdistamolieteperäisiä biokaasuprosessin käsittelyjäännöksiä voidaan hyödyntää esimerkiksi viherrakentamisessa, mutta puhdistamolietteen käyttö maatalouden lannoitteina on viime aikoina puhuttanut paljon. Pelko haitta-aineista on huonontanut puhdistamolieteperäisten lannoitevalmisteiden mainetta ja on saanut elintarviketeollisuuden asettamaan rajoitteita kierrätyslannoitteiden käytölle pelloilla. Esimerkiksi suuret kotimaiset viljan ostajat eivät enää hyväksy puhdistamolietepohjaisia kierrätysravinteita pelloillaan. Taustalla on huoli puhdistamolietepohjaisen käsittelyjäännöksen sisältämistä käsittelyprosessin aikana hajoamattomista orgaanisista haitta-aineista. Biokaasulaitokset ovat vastanneet haasteeseen eriyttämällä puhdistamolietteen prosessissa omalle linjalleen, kun aikaisemmin kaikki syötteen sekoitettiin tasaiseksi syötteen. Käsittelyjäännöksen monivaiheinen prosessi on kuitenkin kallista ja heikentää biokaasuntuotannon kannattavuutta. (Winqvist ym., 2018).

4. MATERIAALIT JA MENETELMÄT

Tutkimuksen kokeellisessa osassa ajettiin kuuden viikon ajan kahta laboratoriomittakaavan CSTR-mallista biokaasureaktoria, joihin syötettiin eri syötettä. Reaktori 1:ssä käytettiin liete 1:stä ja reaktori 2:ssa liete 2:sta. Molemmissa reaktoreissa käytettiin samaa ympäristä joka oli peräisin Viinikanlahden jätevedenpuhdistamon biokaasureaktorista (mädätettä). Reaktoria ajettiin puolijatkuvatoimisesti syöttämällä lietettä ja poistamalla samalla mädätettä joka arkipäivä. Muodostuva biokaasu otettiin talteen kaasupusseilla.

Reaktorin toiminnan aikana analysoitiin seuraavia parametreja: muodostuvan kaasun määrä, kaasun metaanipitoisuus, mädätteen pH sekä syötteen ja mädätteen TS – ja VS. Taulukkoon 1 on koottu suoritettut analyysit, analyysimenetelmät sekä kuinka usein kyseistä analyysia suoritettiin.

Taulukko 1. Kokeiden aikana suoritettut mittaukset

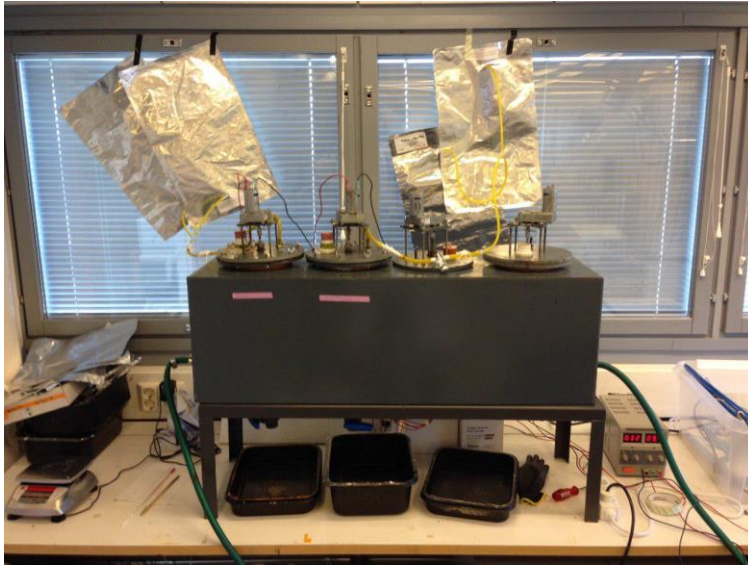
Analyysi	Menetelmä	Kuinka usein
Muodostuneen kaasun tilavuus	Vedensyrjäytysmenetelmä	Yhteensä viisi kertaa
Kaasun metaanipitoisuus	GC	Yhteensä viisi kertaa
Pinnankorkeuden määrittäminen	mittatikku	Arkipäivisin
Lämpötilan mittaus	lämpömittari	Arkipäivisin
Mädätteen pH:n mittaus	pH-mittari	Arkipäivisin
Syötteen ja mädätteen TS – ja VS-analyysit	SFS-3008 mukaan	Kerran viikossa

4.1 Reaktorikonfiguraatio

Tutkimuksessa käytettävät reaktorin olivat kokonaistilavuudeltaan 5,5 L, ja lietteen määrä pidettiin 4 L:ssa, jotta ylikuohumista ei tapahtuisi. Sekoitukseen reaktoreissa käytettiin sähkökäyttöistä mekaanista sekoitusta. Oikea lämpötila (37 °C) reaktoreissa pidettiin yllä vesikierron avulla. Reaktorin kansi oli tiivistetty kumitiivisteillä, kiristysruuveilla sekä kaasutiiviillä korkilla anaerobisten olosuhteiden luomiseksi. Reaktorin viipymäksi valittiin 20 päivää.

Syötteen syöttö ja mädätteen poisto suoritettiin joka arkipäivä. Poistettavat ja lisättävät määrät olivat suunnilleen viipymän perusteella lasketun virtaaman mukaisia, mutta pinnankorkeudesta ja kaasun muodostuksesta riippuen saatettiin syöttää tai poistaa enemmän tai vähemmän syötettä lietetilavuuden pitämiseksi suunnilleen vakiona.

Muodostuva biokaasu kerättiin 10 L kaasupusseihin. Kaasun keräämistä ja analysoimista varten kaasupussin ja biokaasureaktorin väliin asennettiin sulkuventtiili ja näytteenotto-piste. Kuvassa 3 on kuva reaktoreista sekä lisävälineistä.



Kuva 3. Kokonaiskuva koelaitteistosta. Särmiön muotoisen säiliön sisällä on neljä CSTR-reaktoria. Reaktorien ympärillä on vesi-kiertojärjestelmän lämmitysputket. Takana näkyvät metallinväriset pussit ovat kaasupusseja, joihin muodostuva biokaasu kerätään.

4.2 Operointiparametrit

Reaktorin viipymäksi valittiin 20 päivää, sillä se on melko tyypillisen viipymän pituus suomalaisissa oloissa jätevesilietteiden käsittelyssä (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015). Nyt voidaan kaavaa 3 muokkaamalla ratkaista keskimäärin reaktoriin syötettävä lietetilavuus kaavalla 6.

$$Q = \frac{V_r}{HRT}. \quad [6]$$

Koska reaktoria ajettiin vain arkisin, täytyy tulosta muokata siten, että oikea määrä lisätään ja poistetaan arkipäivinä. Arkipäivinä lisättävä ja poistettava tilavuus laskettiin kaavalla 7.

$$Q = \frac{7}{5} \frac{V_r}{HRT}. \quad [7]$$

Kaavalla 7 laskettiin joka arkipäivä lisättäväksi ja poistettavaksi lietemääräksi 280 mL. Laskennallisesta määrästä saatettiin poiketa, jos reaktorin nestetilavuus oli liian kaukana mitoitetusta neljästä litrasta. Kuitenkaan suuria muutoksia nestetilavuudessa ei tapahtunut.

Reaktorien keskimääräinen OLR laskettiin kaavaa 2 soveltamalla: lietteen VS-pitoisuudeksi oletettiin aina viimeisin mittaussarvo, ja kun tiedettiin reaktoriin syötetty lietemäärä tietyssä päivänä, laskettiin suoraan päivässä syötetty VS-määrä reaktorin lietetilavuutta kohden. Näin saatiin laskettua yhden päivän kuormitus, ja päivittäisistä arvoista laskettiin keskiarvo.

4.3 Analyysit

TS – ja VS-analyyseja suoritettiin sekä syötteelle että mädätteelle. Syötteen analysointi aloitettiin heti reaktorikokeiden alussa, kun taas mädätteen analyysit aloitettiin vasta ensimmäisen viipymän jälkeen. Näin ollen voitiin olettaa, että lähes kaikki ympäri oli poistunut reaktorista, ja tulokset edustivat pelkkää lietettä. Laskettaessa reaktoriin syötettyä kokonais-TS – ja VS-määriä, oletettiin, syötettävän lietteen olevan ominaisuuksiltaan yhtenevää viimeisimmän mittaustuloksen kanssa. Analyysit suoritettiin SFS-3008 – standardin (1990) mukaisesti.

Mitattujen TS ja VS-arvojen perusteella laskettiin VS-vähennys. VS-vähennyksellä tarkoitetaan syötteen ja mädätteen VS-arvojen erotusta. VS-vähennys kaavalla 4.

$$VS_{reduction} = \frac{VS_{in} - VS_{out}}{VS_{in}} * 100\%, \quad [4]$$

jossa VS_{in} on reaktoriin syötetty VS ja VS_{out} reaktorista poistettu VS. (Bhattacharya ym., 1995) Lisäksi vastaavalla tavalla laskettiin TS-vähennys.

Metaanintuotto on vastaavanlaisissa pilottikokeissa määritetty kaasukromatografilla. Kaasun kokonaistilavuus puolestaan on mitattu vedensyrjäytysmenetelmällä. (Karppinen, 2017) Tässä kokeessa käytettiin myös vedensyrjäytysmenetelmää ja kaasukromatografia kaasun määrän ja metaanin osuuden määrittämiseen. Kaasukromatografian kalibrointiin käytettiin standardikaasua, joka sisälsi 50 % metaania ja 50 % hiilidioksidia. Metaanipitoisuus mitattiin yhteensä viisi kertaa, ja mittausten perusteella laskettiin metaanin kokonaistilavuus, jonka avulla laskettiin edelleen metaanintuotto lisättyä VS:ää kohden ($LCH_4/kgVS$). Metaanintuotto laskettiin kaavalla 5.

$$V = \frac{V_{CH_4}}{m_{VS}}, \quad [5]$$

Jossa V_{CH_4} on muodostuneen metaanin tilavuus ja m_{VS} on reaktoriin syötetyn VS:n massa.

5. TULOKSET

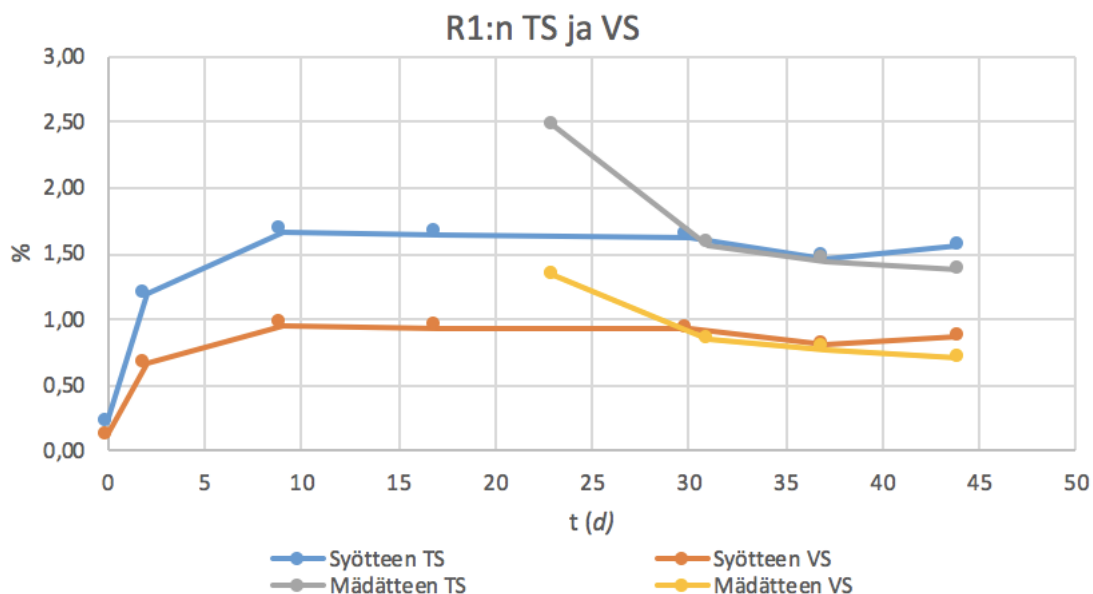
Tässä luvussa kuvataan kokeen suorituksessa saatuja tuloksia. Mitattujen tulosten perusteella laskettiin muodostuneen kaasun kokonaistilavuus, keskimääräinen OLR, keskimääräinen päivittäin syötetty TS ja VS, syötetyn TS:n ja VS:n kokonaismäärät ja TS – ja VS-vähenemät. Taulukkoon 2 on koottu yhteen tärkeimmät tulokset. Lisäksi kuviin 3–6 on piirretty kuvaajat syötteen ja mädätteen TS – ja VS-arvoista, biokaasun muodostumisesta sekä VS-vähenemästä.

Taulukko 2. Kokeiden aikana mitatut suureet

Suure	Reaktori 1	Reaktori 2	Yksikkö
Muodostuneen biokaasun kokonaistilavuus	17,0	14,2	<i>L</i>
Keskimääräinen OLR ja vaihteluväli	0,58 (0,31 – 0,73)	0,66 (0,53 – 0,83)	<i>kgVS/m³d</i>
Keskimääräinen päivässä syötetty VS	2,31	2,65	<i>g</i>
Keskimääräinen päivässä syötetty TS	4,10	3,78	<i>g</i>
Keskimääräinen päivässä poistettu VS (23. päivän jälkeen)	2,30	2,61	<i>g</i>
Biokaasun metaanipitoisuus (keskiarvo, vaihteluväli)	43,7 (39,0 – 47,2)	59,4 (56,8 – 61,8)	%
Metaanintuotto lisättyä VS:ää kohden	91,7	91,0	<i>LCH₄/kgVS</i>
VS-vähenemä (suurin mitattu arvo)	18,6	29,3	%
TS-vähenemä (vaihteluväli)	(1,28 – 12,16)	(0 – 6,69)	%
Syötteen keskimääräinen VS/TS	56,3	70,4	%
Mädätteen pH (keskiarvo ja vaihteluväli)	7,09 (7,00 – 7,48)	7,10 (7,00 – 7,46)	

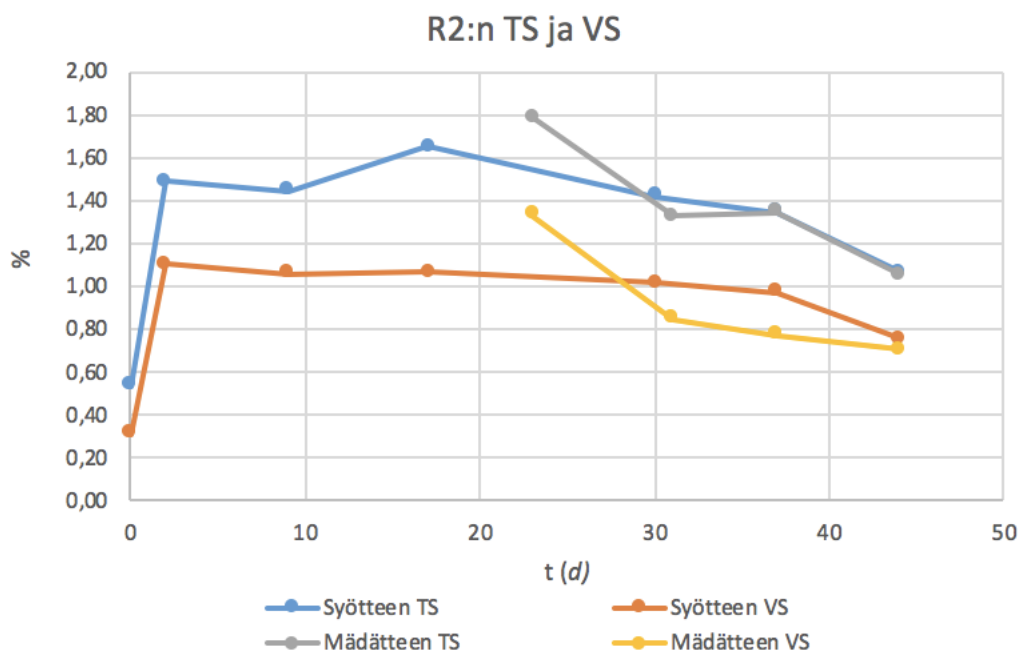
5.1 Kiintoaineen ja orgaanisen aineen muutokset reaktoreissa

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty kuvaajat mitatuista TS:n ja VS:n arvoista molempien reaktorien syötteestä ja mädätteestä.



Kuva 4. Reaktori 1:n TS – ja VS-arvot

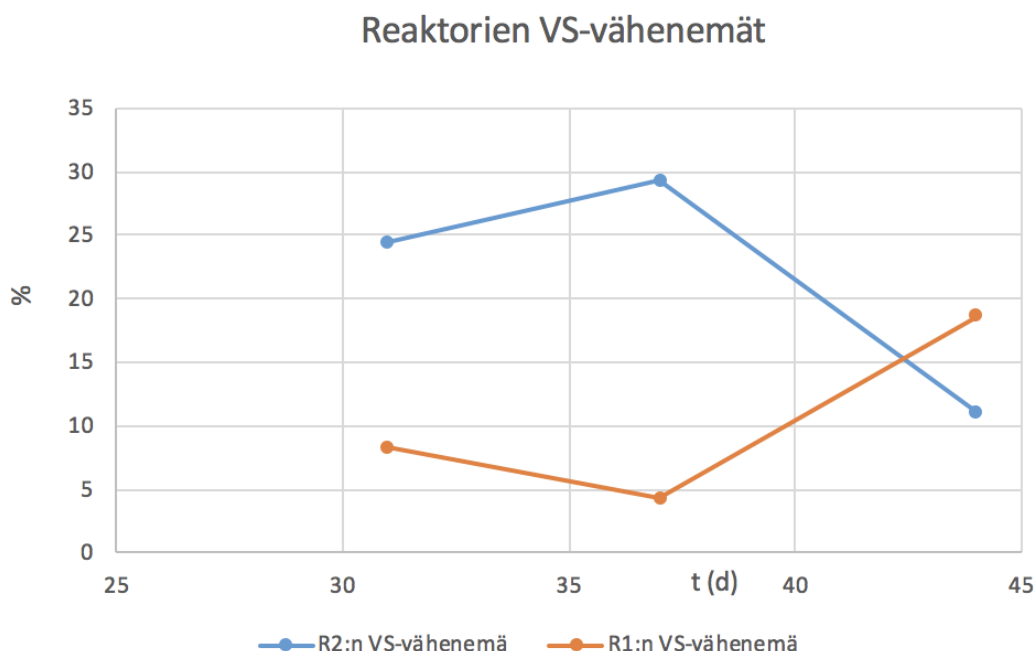
Syötteen TS – ja VS-arvot pysyivät melko vakioina koko kokeen ajan. Jostain syystä reaktori-1:n VS-vähennemä on melko pieni.



Kuva 5. Reaktori 2:n TS – ja VS-arvot

Myös Reaktori 2:n syötteen TS – ja VS-arvot pysyivät melko samanlaisina viimeistä viikkoa lukuunottamatta. Viimeisen viikon alemmat arvot johtuvat uudesta lietekanisterista, joka jouduttiin vaihtamaan vanhan tilalle. Lietekanisterin sisältämä liete oli aiempaa laimeampaa. Mädätettä tarkastellessa huomataan, että VS on vähentynyt selvästi 30. ja 40. päivän välisinä mittauksina.

Molempien reaktorien ensimmäiset mädätteestä mitatut VS – ja TS-arvot ovat syötettä korkeampia. Tämä saattaa johtua sekoittimiin tulleesta viasta, minkä seurauksena kiintoaine saattoi valua reaktoriin pohjalle, josta mädäte poistettiin. Kuitenkin näitä arvoja lukuun ottamatta tulokset vaikuttavat järkeviltä. Mitattujen VS-arvojen perusteella laskettiin molempien reaktorien VS-vähenemät. VS-vähenemät on esitetty kuvassa 6.

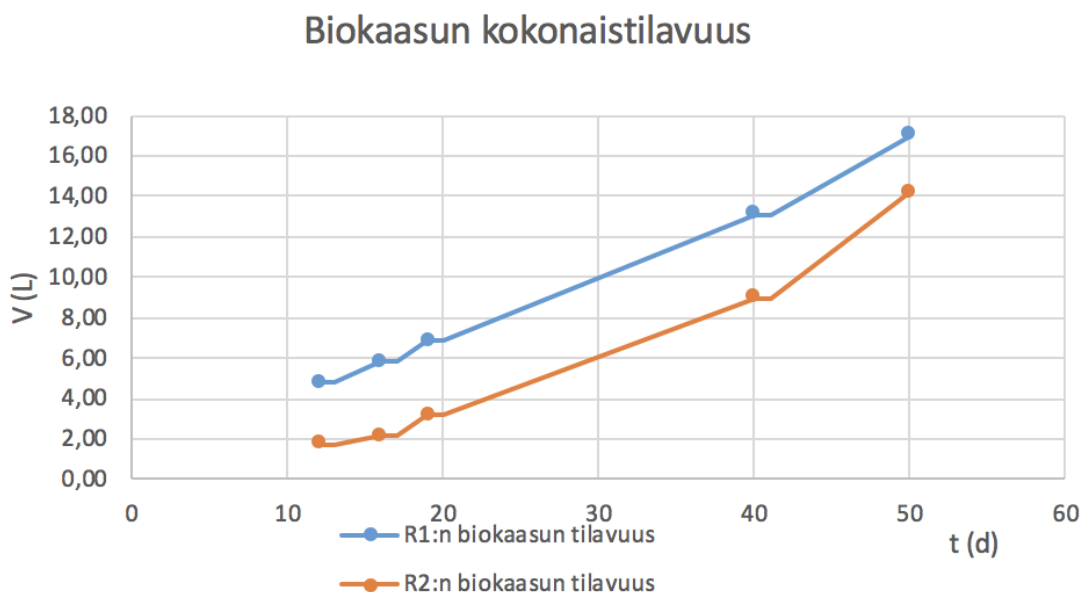


Kuva 6. Reaktorien VS-vähenemät

Reaktori 2:ssa VS-vähenemän oli reaktori-1:stä suurempi viimeistä mittausta lukuun ottamatta. Reaktori-2:n pienempi VS-vähenemä johtuu viimeisen viikon aikana vaihdetusta lietekanisterista, jonka liete oli laimeampaa, kuin aikaisempina viikkoina.

5.2 Reaktorin kuormitus ja muodostunut biokaasu

Reaktori-1:n keskimääräiseksi kuormitukseksi laskettiin 0,58 ja reaktori-2:n 0,66 $kgVS/m^3d$. Kuormitus on huomattavasti pienempi kuin normaalilla suomalaisella märkäprosessilla toimivalla biokaasureaktorilla (4–5 $kgVS/m^3d$) (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015). Biokaasun kokonaistilavuudeksi saatiin reaktori 1:lle 17,0 L ja reaktori 2:lle 14,2 L. Kuvaan 7 on piirretty kuvaajat muodostuneen biokaasun kokonaistilavuudesta kokeiden aikana.



Kuva 7. Biokaasun kokonaistilavuus

Kaasun muodostuminen on molemmissa reaktoreissa pääosin melko tasaista. Reaktori-2:ssa kaasun muodostuminen lisääntyi hieman kokeiden loppua kohden. Mitatut biokaasun metaanipitoisuudet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kaasun metaanipitoisuudet kokeiden aikana

Kokeiden alusta kulu- nut aika (d)	Reaktori 1:n mitattu me- taanipitoisuus (%)	Reaktori 2:n mitattu metaa- nipitoisuus (%)
12	47,2	60,6
15	39,3	56,8
26	39,0	58,0
32	18,4	61,8
40	45,0	59,8

Erityisesti reaktori 2:ssa metaanipitoisuus pysyi samanlaisena kokeiden ajan. Reaktori 1:ssä metaanipitoisuudessa oli hieman enemmän vaihtelua, mutta 28.3. mittauksista lukuun ottamatta arvot pysyivät samassa suuruusluokassa. Koska mitattuja arvoja on vain viisi kappaletta, eikä arvoissa näy trendejä merkittävästä kasvusta tai noususta, käytettiin metaanipitoisuuden ja metaanintuoton VS:ää kohden laskemiseen mittausten keskiarvoa. Koska Reaktori 1:stä 28.3. mitattu arvo poikkeaa niin paljon muista tuloksista, jätettiin se huomioimatta keskiarvoa laskettaessa. Reaktori 1:lle saatiin metaanipitoisuuden keskiarvoksi 43,7 % ja reaktori 2:lle 59,4 %. Metaanipitoisuuden avulla saatiin määritettyä muodostuneen metaanin tilavuus ja edelleen metaanintuotto lisättyä VS:ää kohden kaavan 8 avulla. Metaanintuotoksi saatiin liete 1:lle 91,7 $LCH_4/kgVS$ ja liete 2:lle 91,0 $LCH_4/kgVS$.

6. TULOSTEN TARKASTELU JA YHTEENVETO

Metaanin osuus muodostuvan biokaasun kokonaistilavuudesta on yleensä 60-70 % (Davis, 2011). Reaktori 2:ssa kaasun metaanipitoisuus oli lähes 60 %, mutta reaktori 1:n metaanipitoisuus jäi selvästi pienemmäksi (43,7 %). Myös VS/TS-suhde oli reaktori 1:ssä huomattavasti pienempi. VS/TS-suhde on suomalaisilla puhdistamolietteillä tyypillisesti välillä 64–75 %. Tutkituista lietteistä liete 2:n VS/TS-suhde on tällä alueella (70,4 %), mutta liete 1:n vastaava luku oli huomattavasti pienempi (56,3 %).

Puhdistamolietteiden metaanintuotot vaihtelevat tyypillisesti välillä 160–400 $LCH_4/kgVS$ (Kymäläinen ja Pakarinen, 2015, Wellinger ym., 2013). Molempien reaktorien metaanintuotto jäi alle 100 $LCH_4/kgVS$:n, eli selvästi alhaisemmaksi. Vastaavanlaisissa kokeissa metaanin saannoksi on saatu yhdyskuntajätevedenpuhdistamon primäärilietteelle 372 $LCH_4/kgVS$ (Hautamäki, 2017) ja primääri – ja sekundaarilietteen sekoitukselle 198 $LCH_4/kgVS$ (Fathi Aghdam, 2014). Molempien reaktorien VS-vähenemät jäivät myös vastaavanlaisia kokeita pienemmiksi: samankaltaisissa kokeissa VS-vähenemäksi on saatu 63 % (Hautamäki, 2017). kun taas vastaava suurin mitattu arvo oli reaktori 1:ssä vain 18,6 % ja reaktori 2:ssa 29,3 %.

Molempiin reaktoreihin syötettävä liete oli huomattavasti laimeampaa, kuin tyypillisessä puhdistamolietteiden anaerobisessa käsittelyssä, tai laboratoriomittakaavan kokeissa. Näin ollen reaktoreiden OLR jäi myös pienemmäksi, kuin vastaavanlaisissa kokeissa. Reaktori 1:n OLR oli 0,58 $kgVS/m^3d$ ja reaktori 2:n 0,66 $kgVS/m^3d$, kun vastaavanlaisissa kokeissa OLR on ollut 1–2 $kgVS/m^3d$ (Hautamäki, 2017, Fathi Aghdam, 2014). Kuitenkaan reaktorin kuormituksen ei pitäisi vaikuttaa metaanintuottoon VS:ää kohden, vaan ainoastaan lisätä metaanintuottoa ajan suhteen (Wellinger ym., 2013). Näin ollen tavallista pienempää metaanintuottoa ei voida suoraan selittää tavallista laimeammalla lietteellä.

Kokeiden aikana esiintyi joitain teknisiä ongelmia, mutta niillä ei ollut suurta vaikutusta prosessiolosuhteisiin. Molemmissa reaktoreissa lämpötila ja pH pysyivät vakaina koko prosessin ajan, ja syötteelle ja mädätteelle tehdyissä mittauksissa ei esiintynyt selittämättömiä normaalia poikkeavia arvoja. Yleisesti voidaan olettaa, että olosuhteet reaktoreiden sisällä pysyivät riittävän hyvinä ja tarpeeksi realistisinä täyden mittakaavan biokaasureaktoriin nähden.

Kokeet antoivat suuntaa antavan kuvan lietteiden metaanintuottopotentialista. Tarkempien tulosten saamiseksi lietteitä voitaisiin tutkia esimerkiksi BMP-testillä (Wellinger ym., 2013). Lisäksi lietteiden kemiallisia ominaisuuksia olisi hyvä analysoida tarkemmin ennen täyden mittakaavan prosessin aloittamista. Saadut tulokset kuitenkin osoittivat, että lietteillä on jonkinlaista metaanintuottopotentialia, joten jatkotutkimuksia voidaan tulevaisuudessa tarvittaessa harkita. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa voitaisiin myös tutkia erilaisten viipymien ja kuormitusten vaikutusta metaanin tuottoon ja VS-vähenemään.

7. LÄHTEET

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Jansen, R., Biogas Handbook. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008

Bhattacharya Sanjoy K., Madura Richard L., Walling David A., Farrel Joseph B., Volatile Solids Reduction in Two-phase and Conventional Anaerobic Sludge Digestion, Water Research, 1995

Davis, Mackenzie L., Water and wastewater engineering: design principles and practice, McGraw-Hill, 2011.

Fathi Aghdam Ehsan, Optimization of methane production from anaerobic co-digestion of municipal solid waste and sewage sludge, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014, saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/22549>

Hautamäki Hanna, Yhdyskuntajäteveden esikäsittely mikrosiivilällä ja erotetun lietteen anaerobinen käsittely, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017, saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/25240>

Huttunen Markku, Kuittinen Ville, Lampinen Ari, Suomen biokaasulaitosrekisteri N:O 21, University of Eastern Finland, 2017

Karppinen Tiina, Anaerobic digestion of sedimented fiber from pulp industry for hydrolysis and biogas production, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017, saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/26384>

Karttunen Erkki, Tuhkanen Tuula, Kiuru Heikki, Vesihuolto: 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto, 2004

Kress Philip, Nägele Hans-Joachim, Oechsner Hans, Ruile Stephan, Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters, 2018

Kymäläinen Maritta, Pakarinen Outi, Biokaasuteknologia – raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen, Suomen Biokaasuyhdistys ry, 2006

Latvala Markus, Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) – biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä, Suomen ympäristökeskus, 2009

Mao, C., Feng, Y., Wang, X. & Ren, G., Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015

Sawatdeenarunat Chayanon, Nguyen Duc, Surendra K.C, Shrestha Shilva, Rajendran Karthik, Oechsner Hans, Xie Li, Kumal Khanal Samir, Anaerobic biorefinery: current status, challenges, and opportunities, 2016

Scarlatm Nicolae, Dallenand Jean-françois, Fahl Fernando, Biogas: developments and perspectives in Europe, European commission, Joint research Centre, directorate for energy transport and Climate, 2018

SFS 3008, Determination of Total Residue and Total Fixed Residue in Water, Sludge and Sediment. Helsinki, Finland, Finnish Standards Association, 1990

Wang Lawrence K., Shammass Nazih, Selke William, Aulenbach Donald, Flotation technology, 2010

Wellinger Arthur, Murphy Jerry, Baxter David, The Biogas Handbook, Woodhead, 2013

Winqvist Erika, Riikonen Pasi, Varho Vilja, Suomen biokaasualan haasteet ja mahdollisuudet, Luonnonvarakeskus, 2018, saatavilla <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/542787>

Winqvist Erika, Suomen biokaasupotentiaali käyttöön vastaamaan ilmastohaasteeseen, Luonnonvarakeskus, 2018, saatavilla: <https://www.luke.fi/blogi/suomen-biokaasupotentiaali-kayttoon-vastaamaan-ilmastohaasteeseen/>, viitattu: 9/2019